

Siemens LTDA
Automation & Control – Drive Technology
PUBLICAÇÃO TÉCNICA

SELEÇÃO DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA 1GG e 1GH

Engº. Flávio Honda

30 de março de 2004

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o desenvolvimento das técnicas de acionamentos de corrente alternada (CA) e a viabilidade econômica têm favorecido a substituição dos motores de corrente contínua (CC) pelos motores de indução com conversores de frequência. Apesar disso, o motor CC ainda se mostra a melhor opção em algumas aplicações, tais como:

- Máquinas de Papel
- Máquinas de Impressão
- Extrusoras
- Prensas
- Elevadores
- Acionamentos de Transporte e Elevação de Cargas

O objetivo deste texto é fornecer base técnica sobre o motor de corrente contínua – aspectos construtivos, princípio de funcionamento, controle de velocidade, vantagens e desvantagens –, e auxiliar o leitor em uma correta seleção de motores do tipo **1GG** e **1GH**.

2. O MOTOR CC

2.1. Aspectos Construtivos

O motor de corrente contínua é composto de duas estruturas magnéticas:

- Estator (enrolamento de campo ou ímã permanente);
- Rotor (enrolamento de armadura).

O estator é composto de uma estrutura ferromagnética com pólos salientes aos quais são enroladas as bobinas que formam o campo, ou de um ímã permanente. A Fig. 1 mostra o desenho de um motor CC de 2 pólos com enrolamento de campo.

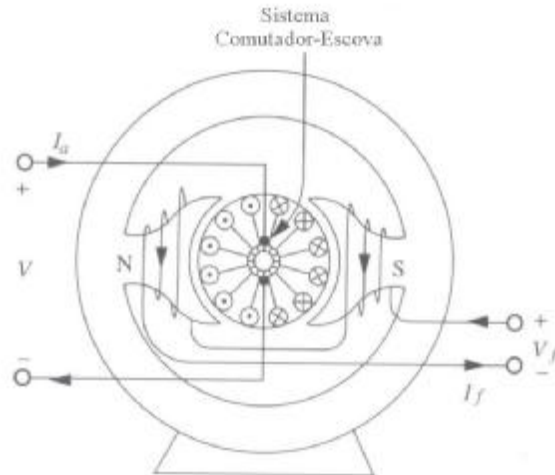


Fig. 1 – Desenho de um motor CC de 2 pólos

O rotor é um eletroímã constituído de um núcleo de ferro com enrolamentos em sua superfície que são alimentados por um sistema mecânico de comutação (Fig. 2). Esse sistema é formado por um comutador, solidário ao eixo do rotor, e que possui uma superfície cilíndrica com diversas lâminas às quais são conectados os enrolamentos do rotor; e por escovas fixas, que exercem pressão sobre o comutador e que são ligadas aos terminais de alimentação. Os enrolamentos do rotor compreendem bobinas de n espiras. Os dois lados de cada enrolamento são inseridos em sulcos com espaçamento igual ao da distância entre dois pólos do estator, de modo que quando os condutores de um lado estão sob o pólo norte, os condutores do outro devem estar sob o pólo sul. As bobinas são conectadas em série através das lâminas do comutador, com o fim da última conectada ao início da primeira, de modo que o enrolamento não tenha um ponto específico.

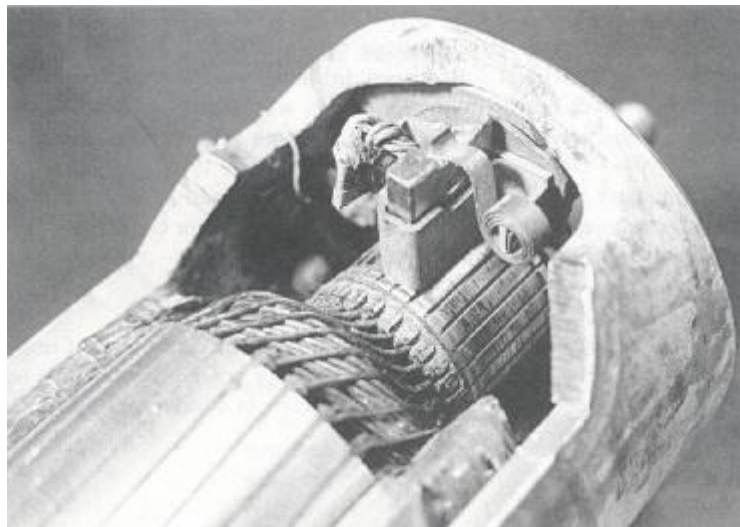


Fig. 2 – Sistema de Comutação

2.2. Princípio de Funcionamento

A Fig. 3 mostra, de maneira simplificada, o funcionamento do motor CC.

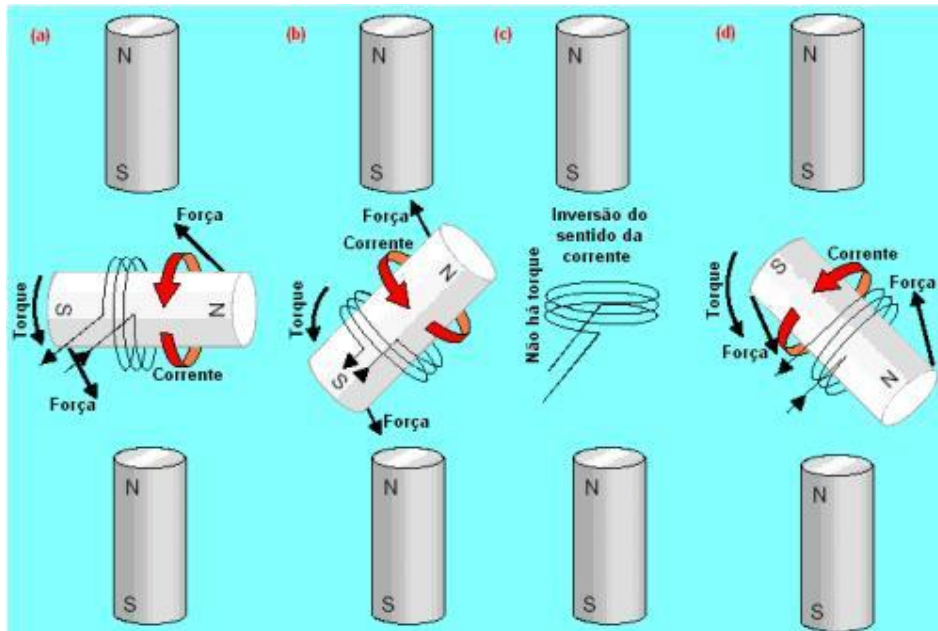


Fig. 3 – Princípio de funcionamento do motor CC

A figura acima é um desenho esquemático simples de um motor onde o estator é constituído por ímãs permanentes e o rotor é uma bobina de fio de cobre esmaltado por onde circula uma corrente elétrica. Uma vez que as correntes elétricas produzem campos magnéticos, essa bobina se comporta como um ímã permanente, com seus polos N (norte) e S (sul) como mostrados na figura.

Começemos a descrição pela situação ilustrada em (a) onde a bobina apresenta-se horizontal. Como os polos opostos se atraem, a bobina experimenta um torque que age no sentido de girar a bobina no sentido anti-horário. A bobina sofre aceleração angular e continua seu giro para a esquerda, como se ilustra em (b).

Esse torque continua até que os polos da bobina alcance os polos opostos dos ímãs fixos (estator). Nessa situação (c) – a bobina girou de 90° – não há torque algum, uma vez que os braços de alavanca são nulos (a direção das forças passa pelo centro de rotação); o rotor está em equilíbrio estável (força resultante nula e torque resultante nulo). Esse é o instante adequado para inverter o sentido da corrente na bobina. Agora os polos de mesmo nome estão muito próximos e a força de repulsão é intensa. Como a bobina já apresenta um momento angular “para a esquerda”, ela continua girando no sentido anti-horário (semelhante a uma “inércia de rotação”) e o novo torque (agora propiciado por forças de repulsão), como em (d), colabora para a manutenção e aceleração do movimento de rotação.

Mas, mesmo após a bobina ter sido girada de 180° , situação não ilustrada na figura, o movimento continua, a bobina chega na “vertical” – giro de 270° –, o torque novamente se anula, a corrente novamente inverte seu sentido, há um novo torque e a bobina chega novamente à situação (a) – giro de 360° –. E o ciclo se repete.

Essas atrações e repulsões bem coordenadas é que fazem o rotor girar. A inversão do sentido da corrente (comutação), no momento oportuno, é condição indispensável para a manutenção dos torques “favoráveis”, os quais garantem o funcionamento dos motores.

A comutação de uma bobina do enrolamento do rotor consiste na mudança de uma lâmina do comutador, onde as bobinas são ligadas em série, para a próxima. Durante esta comutação a bobina é momentaneamente curto-circuitada pelas escovas, o que ajuda a liberar energia armazenada, antes de a corrente fluir no sentido oposto. Isso gera faíscas entre o comutador e as escovas.

A Fig. 4 mostra um desenho esquemático bastante simplificado de um motor CC com apenas uma bobina, o comutador e as escovas.

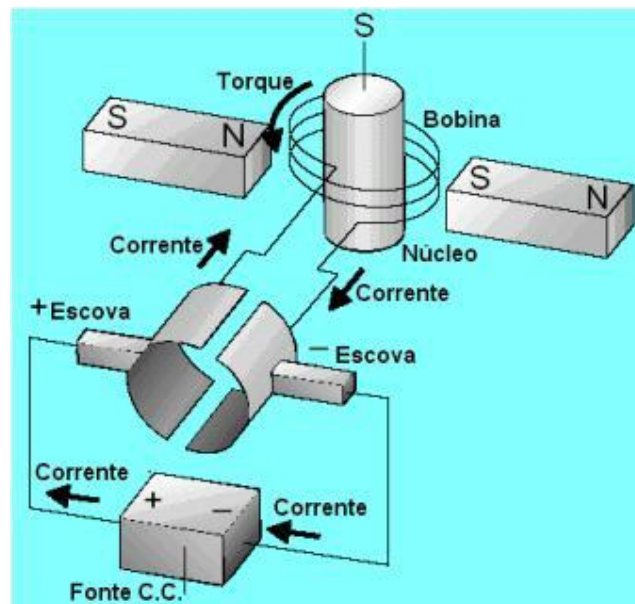


Fig. 4 – Comutador e escovas

Em sua forma mais simples, o comutador apresenta duas placas de cobre encurvadas e fixadas (isoladamente) no eixo do rotor; os terminais do enrolamento da bobina são soldados nessas placas. A corrente elétrica “chega” por uma das escovas (+), “entra” pela placa do comutador, “passa” pela bobina do rotor, “sai” pela outra placa do comutador e “retorna” à fonte pela outra escova (-). Nessa etapa o rotor realiza sua primeira meia-volta. Nessa meia-volta, as placas do comutador trocam seus contatos com as escovas e a corrente inverte seu sentido de

percurso na bobina do rotor. E o motor CC continua girando, sempre com o mesmo sentido de rotação.

2.3. Controle de Velocidade nos Motores CC

O modelo do circuito elétrico do motor CC é ilustrado na Fig. 5.

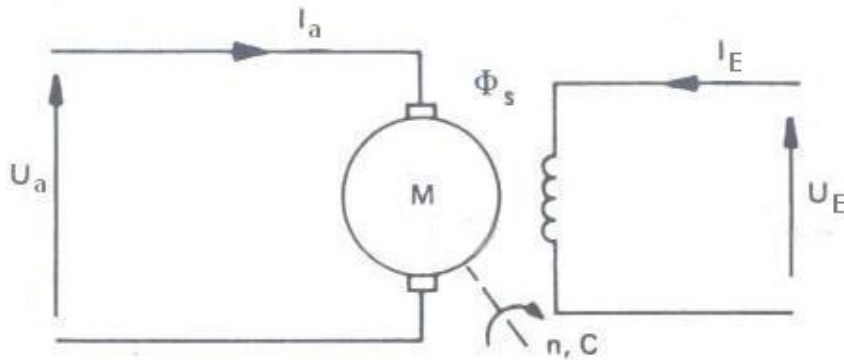


Fig. 5 – Modelo do circuito elétrico do motor CC

A Lei de Kirchhoff aplicada ao circuito de armadura resulta em:

$$U_a = R_a \cdot I_a + E \quad (1)$$

Onde: \$U_a\$ = Tensão de armadura

\$R_a\$ = Resistência da armadura (não ilustrada na Fig. 5)

\$I_a\$ = Corrente de armadura

\$E\$ = Força Eletromotriz da armadura

A força eletromotriz é proporcional ao fluxo e à velocidade do rotor, ou seja:

$$E = k_1 \cdot \Phi \cdot n \quad (2)$$

Combinando as eq. (1) e (2), a expressão para a velocidade do motor CC é dada por:

$$n = k_1 \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{\Phi} \quad (3)$$

Onde: \$n\$ = velocidade

\$k_1\$ = constante

\$\Phi\$ = fluxo no entreferro

Admitindo-se que a queda de tensão na armadura é pequena, ou seja $R_a \cdot I_a \cong 0$, a expressão (1) se reduz a:

$$n = k_1 \frac{U_a}{f} \quad (4)$$

Portanto, a velocidade é diretamente proporcional à tensão de armadura, e inversamente proporcional ao fluxo no entreferro.

O controle da velocidade, até a velocidade nominal¹, é feita através da variação da tensão de armadura do motor, mantendo-se o fluxo constante.

Velocidades superiores à nominal podem ser conseguidas pela diminuição do fluxo, mantendo-se a tensão de armadura constante.

Sabendo que o fluxo é proporcional à corrente de campo, ou seja:

$$f = k_2 \cdot I_E \quad (5)$$

Onde: k_2 = constante

I_E = corrente de campo

Tais velocidades são atingidas através da diminuição da corrente de campo, mantendo-se a tensão de armadura constante.

O conjugado do motor é dado por:

$$C = k_3 \cdot I_a \cdot f \quad (6)$$

Onde: C = conjugado eletromagnético do motor

k_3 = constante

O controle de velocidade, até à rotação nominal é feita através da variação da tensão da armadura, mantendo-se o fluxo constante. Dessa forma, observando-se a equação (6) a corrente de armadura se eleva transitoriamente, de forma apreciável, de modo a produzir o conjugado total requerido pela carga, mais o conjugado necessário para a aceleração.

O conjugado acelerador incrementa a velocidade da máquina e, de acordo com a equação (2), a força eletromotriz induzida no motor também aumenta. Dessa forma, segundo a equação (1), a corrente transitória cai até um ponto de equilíbrio, que corresponde à manutenção do torque exigido pela carga. Esse ponto de equilíbrio é definido pelo valor da tensão de armadura aplicado e pela queda de tensão na resistência de armadura, como mostra a equação (1). Se o conjugado requerido pela carga for constante, o motor tenderá a supri-lo, sempre absorvendo uma corrente de armadura também praticamente constante. Somente durante as acelerações provocadas pelo aumento da tensão, que transitoriamente a corrente se eleva para provocar a aceleração da

¹ A velocidade nominal do motor é definida através da corrente de armadura nominal pelos aspectos térmicos do dimensionamento do motor.

máquina, retornando após isso, ao seu valor original. Portanto, em regime, o motor CC opera a corrente de armadura essencialmente constante também. O nível dessa corrente é determinado pela carga no eixo. Assim, no modo de variação pela tensão de armadura, até a rotação nominal, o motor tem a disponibilidade de acionar a carga exercendo um torque constante em qualquer rotação de regime estabelecida, como mostra a Fig. 6. Esse torque pode ser qualquer, até o limite do valor nominal, que corresponde a uma corrente de armadura nominal, definida por aspectos térmicos de dimensionamento do motor.

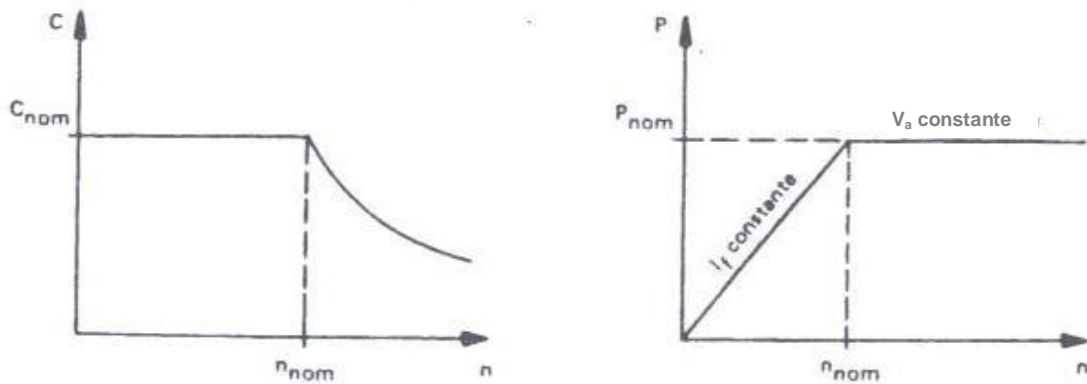


Fig. 6 – Curvas Torque x Rotação e Potência x Rotação

O controle da velocidade após a rotação nominal é feito variando-se o fluxo e mantendo a tensão de armadura constante. Pela equação (2), para se aumentar a velocidade, deve-se reduzir o fluxo, existindo entre ambos, uma relação hiperbólica. Como o conjugado é proporcional ao fluxo, ele comporta-se como mostrado na Fig. 6

2.4. Vantagens e Desvantagens dos Motores CC

Vantagens:

- Flexibilidade (vários tipos de excitação)
- Relativa simplicidade dos modernos conversores CA/CC
- Desejáveis para altos conjugados e ampla variação de velocidade
- Facilidade em controlar a velocidade
- Alto torque a baixas rotações

Desvantagens:

- Maiores e mais caros que os motores de indução, para uma mesma potência
- Maior necessidade de manutenção (devido aos comutadores)

- Arcos e faíscas devido à comutação de corrente por elemento mecânico (não pode ser aplicado em ambientes perigosos)
- Tensão entre lâminas não pode exceder 20V, ou seja, não podem ser alimentados com tensão superior a 900V, enquanto que motores de corrente alternada podem ter milhares de volts aplicados aos seus terminais.
- Necessidade de medidas especiais de partida, mesmo em máquinas pequenas.

3. SELECIONANDO UM MOTOR CC

Para se selecionar um motor CC deve-se dispor de todos os dados necessários, quais são:

1. Tipo de Refrigeração
2. Tensão de armadura
3. Potência, Rotação e Torque requeridos
4. Tensão de Campo
5. Forma Construtiva
6. Grau de Proteção
7. Posição da Caixa de Terminais e Entrada de Cabos
8. Temperatura Ambiente e Altitude de Instalação
9. Opcionais

Com os dados acima, passa-se a selecionar o motor no catálogo.

O seguinte catálogo está disponível para os motores CC:

- **DA12-2004**

Ele pode ser encontrado em: www.siemens.com.br/motores

3.1. Tipos de Refrigeração

O tipo de refrigeração determina o tipo do motor.

Os motores 1GG possuem ventilação forçada através de **ventilador** montado radialmente.

Os motores 1GH possuem ventilação forçada através de **duto**.



Fig. 7 – Motores 1GG (dir.) e 1GH (esq.)

Escolhido o tipo de refrigeração, é preciso definir:

- Para o caso de motor 1GG:
 - a. Localização do ventilador, se na parte frontal ou traseira. Isso determina o sentido do fluxo interno de ar pelo motor.
 - b. Posição do ventilador, se no topo, direita, esquerda ou embaixo.
 - c. Sentido da tomada de ar do ventilador.

- Para o caso de motor 1GH:
 - a. Se os dutos de ar serão conectados em apenas um lado do motor, ou em ambos os lados, dependendo do grau de proteção requerido.
 - b. Sentido do fluxo interno de ar pelo motor.
 - c. Posição de conexão dos dutos, se no topo, direita, esquerda ou embaixo.

Cada uma das escolhas acima se refere a um opcional (-Z) que deve ser incluído no código (MLFB) do motor, a menos que a versão selecionada seja standard.

3.2. Tensão de Armadura

Como visto no tópico 2, a tensão de armadura é proporcional à velocidade do motor até à rotação nominal.

Com a tensão de armadura e a rotação requeridas, deve-se proceder da seguinte forma:

- Se a tensão de armadura requerida for igual a uma das tensões disponíveis, é preciso apenas selecionar a rotação pelo catálogo.
- Se a tensão de armadura requerida for diferente das tensões disponíveis, deve-se selecionar um motor com uma tensão imediatamente acima. Assim fazendo, deve-se verificar se a rotação atenderá à especificação, uma vez que ela é reduzida proporcionalmente com a tensão.

Por exemplo:

Tensão de armadura requerida: 440V. Rotação nominal requerida: 2100RPM.

Tensão de armadura disponível: 470V. Rotação nominal em 470V: 2260rpm.

Se esse motor for ligado em 460V, irá fornecer uma rotação nominal de 2212rpm, e, portanto, atende à especificação.

3.3. Potência, Rotação e Torque Requeridos

Do ponto de vista da carga, o motor deve **atender ao torque requerido, na rotação especificada**. Geralmente, os dados fornecidos pelo cliente são POTÊNCIA E ROTAÇÃO. O torque pode ser deduzido pela expressão:

$$P = T \cdot w \Rightarrow T = \frac{P}{w} \Rightarrow T = \frac{60}{2\pi} \frac{P}{N} \Rightarrow T = 9,55 \cdot \frac{P}{N} \quad (7)$$

Onde: T é dado em N.m

P deve ser dado em W

N deve ser dado em RPM

Neste ponto, cabe uma observação sobre a curva de torque do motor (Fig.6).

Atente para o fato de que um motor pode atender à especificação do cliente na região de torque constante, **OU** na região de enfraquecimento de campo. Isso é extremamente importante para se evitar um superdimensionamento do motor. Acima da velocidade nominal, o torque pode ser deduzido da eq. (7), uma vez que nessa região a potência é constante. Se o motor atender à especificação na região de enfraquecimento de campo, deve ser levado à APROVAÇÃO DO CLIENTE.

3.4. Tensão de Campo

A tensão de campo refere-se ao 11º dígito do código do motor.

Exemplo: Dígito “4” – 310 Vcc.

3.5. Forma Construtiva

A forma construtiva é definida pelo 12º dígito do código do motor.

Exemplo: Dígito “0” – Forma construtiva IM B3.

3.6. Grau de proteção

O grau de proteção standard dos motores 1GG e 1GH é IP 23.

Se necessário, o grau de proteção pode ser aumentado para IP 55 com o opcional K49.

3.7. Posição da Caixa de Terminais e Entrada de Cabos

A posição da Caixa de Terminais deve ser escolhida em conjunto com a posição do ventilador ou da conexão do duto de refrigeração para que não haja incompatibilidade na construção mecânica do motor. A caixa de terminais pode ser estar no topo, no lado direito, ou esquerdo do motor.

IMPORTANTE! A posição da caixa de terminais descrita no catálogo é sempre com referência à vista da ponta de eixo do motor. Dessa forma, caixa de terminais à esquerda, equivale, por exemplo, ao código ABNT IM B3D, e vice-versa.

A posição da entrada de cabos na caixa de terminais também deve ser especificada.

Cada uma das escolhas acima se refere a um opcional (-Z) que deve ser incluído no código (MLFB) do motor, a menos que a versão selecionada seja standard.

3.8. Temperatura ambiente e Altitude de Instalação

Os motores 1GG e 1GH são preparados para operar em ambientes com temperaturas menores que 40°C e altitudes abaixo de 1000m (inclusive).

Caso as características da instalação sejam diferentes das citadas acima, deve-se observar os gráficos de potência e rotação em função da temperatura ambiente e da altitude de instalação para se prever o de-rating.

3.9. Opcionais

À versão standard dos motores CC podem ser adicionados uma ampla variedade de opcionais, de acordo com a necessidade da aplicação. Chamamos a atenção para os mais freqüentemente consultados.

- a. Dispositivos de Proteção e Monitoramento
 - § Termistor PTC para alarme e/ou desligamento
 - § Termistor NTC para alarme e/ou desligamento
 - § Sensor de temperatura KTY 84-130
 - § Sensor PT100
 - § Chave termostática bimetálica para desligamento
 - § Monitoramento do comprimento das escovas

- b. Tacômetros e Geradores de Pulso
 - § Tacômetros são definidos por Volts/1000RPM.
 - § Geradores de pulso (encoder) são definidos por PULSOS/REVOLUÇÃO.

Outros opcionais estão disponíveis, tais como:

- Rolamentos especiais, para cargas radiais elevadas;
- Resistência de desumidificação;
- Monitoramento do fluxo de ar de refrigeração (para motores 1GG);
- Grau de severidade de vibração aumentado;
- Pintura em cor especial;
- Filtro e silenciador;
- Freios.

4. ALGUMAS INFORMAÇÕES ADICIONAIS IMPORTANTES:

Pintura standard:

- RAL 7016, para carcaças até 400, inclusive
- RAL 7030, para carcaças 500 e 630.

Características do ventilador standard para os motores 1GG5.

- 1GG5 100 e 1GG5 102: 0,26/0,15 A em 220/380 V, 50 Hz, 2900 RPM
0,28/0,16 A em 254/440 V, 60 Hz, 3450 RPM
- 1GG5 104 a 1GG5 116: 0,50/0,29 A em 220/380 V, 50 Hz, 2845 RPM
0,55/0,32 A em 254/440 V, 60 Hz, 3370 RPM
- 1GG5 118 a 1GG5 136: 0,78/0,45 A em 220/380 V, 50 Hz, 2870 RPM
0,92/0,53 A em 254/440 V, 50 Hz, 3400 RPM
- 1GG5 162 a 1GG5 166: 1,06/0,61 A em 220/380 V, 50 Hz, 2750 RPM
1,37/0,79 A em 254/440 V, 60 Hz, 3175 RPM

5. EXEMPLO

Dados fornecidos pelo cliente:

MOTOR CC DE 50CV, 1800RPM, IP 23, TENSÃO DE ARMADURA DE 440V, TENSÃO DE CAMPO DE 310V, IM B3D, ENTRADA DE CABOS POR BAIXO, VENTILAÇÃO FORÇADA COM VENTILADOR MONTADO NO TOPO, FLUXO DE AR DA PARTE TRASEIRA PARA A FRONTAL, TOMADA DE AR NO VENTILADOR A PARTIR DA PARTE FRONTAL, TEMPERATURA AMBIENTE < 40°C, ALTITUDE < 1000M. COM TACOGERADOR 60V/1000RPM E PROTEÇÃO TÉRMICA DOS ENROLAMENTOS PTC PARA ALARME E DESLIGAMENTO.

Solução:

1. Tipo de Refrigeração

Por ventilador. Isso define o motor tipo **1GG**.

2. Tensão de armadura

440V

3. Potência, Rotação e Torque requeridos

Com a potência e a rotação fornecidas, calcula-se o torque:

$$T = 9,55 \frac{P}{N} \Rightarrow T = 9,55 \frac{50 \cdot 0,735 \cdot 1000}{1800} \Rightarrow \boxed{T = 195Nm}$$

Olhando-se o catálogo, o motor deve ser selecionado dentro da família 1GG5 164.

Passemos a analisar as alternativas:

i. 1GG5 164-0GG..-6WV1

Tensão nominal de armadura: 470 V

Rotação nominal em 470 V: 2010 RPM

Rotação nominal em 440 V: 1882 RPM

Torque nominal abaixo de 2010 RPM: 201 Nm

Portanto, esse motor ATENDE ÀS ESPECIFICAÇÕES.

ii. 1GG5 164-0GF..-6WV1

Tensão nominal de armadura: 470 V

Rotação nominal em 470 V: 1720 RPM

Rotação nominal em 440 V: 1610 RPM. Esse motor deverá operar na região de enfraquecimento de campo para atingir os 1800 RPM.

Potência nominal em 440 V: 35,1 kW

Torque em 1800 RPM (com enfraquecimento de campo): 186,3Nm

Portanto, esse motor NÃO ATENDE ÀS ESPECIFICAÇÕES.

Dessa forma, o motor selecionado é o **1GG5 164-0GG..-6WV1**.

4. Tensão de Campo

310 V \Rightarrow **1GG5 164-0GG4.-6WV1**

5. Forma Construtiva

IM B3 ⇒ **1GG5 164-0GG40-6WV1**

6. Grau de Proteção

IP 23, oferecido como **standard** pelo motor 1GG5.

7. Dados adicionais sobre o ventilador

Posição, montado no topo ⇒ **versão standard**.

Sentido do fluxo de ar, da parte traseira para frontal, com tomada de ar a partir da parte frontal: Ventilador montado na parte traseira ⇒ **G05**.



8. Posição da Caixa de Terminais e Entrada de Cabos

Posição da caixa de terminais: IM B3D, lado esquerdo visto da ponta de eixo ⇒ **K10**

Entrada de cabos por baixo ⇒ **versão standard**.

9. Temperatura Ambiente e Altitude de Instalação

Temperatura ambiente < 40°C e altitude de instalação < 1000m. ⇒ **não há de-rating**.

10. Opcionais

Tacômetro: 60V/1000RPM ⇒ **H14**

Proteção térmica dos enrolamentos: PTC para alarme e desligamento ⇒ **A12**.

Código final do motor: **1GG5 164-0GG40-6WV1-Z, Z=G05+K10+H14+A12**

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COGDELL, J.R. "FOUNDATIONS OF ELECTRIC POWER". Prentice Hall.
- [2] LOBOSCO, O. S., DIAS, J. L. C. "SELEÇÃO E APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS". McGraw-Hill, Volume 1.
- [3] STMicroelectronics – Total System Solutions for Motor Control
<http://www.us.st.com/stonline/products/support/motor/>
- [4] Feira de Ciências
<http://www.feiradeciencias.com.br/>

Sobre o autor:

FLAVIO HONDA

Engenheiro Mecatrônico pela Escola Politécnica da USP (EPUSP)

Engenheiro de Produto no departamento *Drive Technology*,
responsável pelos Acionamentos CC (Motores CC e Conversores
CA/CC) e Conversor de Freqüências SINAMICS G150.